



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0). La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, le numéro de l'article et le DOI.

La plongée scientifique, un outil essentiel pour l'étude des écosystèmes lacustres

Stéphan JACQUET^{1,5}, Aurélien JAMONEAU^{2,5}, Vincent BERTRIN^{2,5}, Julien DUBLON^{3,5}, Jean-Marc BAUDOIN^{3,4,5}, Samuel WESTRELIN^{3,5}

¹ Université Savoie-Mont Blanc, INRAE, CARTEL, 75 bis avenue de Corzent, 74203 Thonon-les-Bains, France.

² INRAE, EABX, 50 avenue de Verdun, 33612 Cestas-Gazinet, France.

³ INRAE, Aix Marseille Université, RECOVER, 13182, Aix-en-Provence, France.

⁴ OFB, DRAS, Service EcoAqua, Aix-en-Provence, France.

⁵ Pôle R&D ECLA, France.

Correspondance : Stéphan JACQUET, stephan.jacquet@inrae.fr

La plongée scientifique, en scaphandre ou en apnée, est une approche originale qui apporte des possibilités et des complémentarités aux moyens techniques déployés depuis la surface. Cet article illustre quelques réalisations concrètes permises grâce à la plongée pour observer, instrumenter et étudier les écosystèmes aquatiques lacustres.

Introduction

La plongée scientifique constitue un outil essentiel pour l'étude des écosystèmes aquatiques et des processus naturels se déroulant sous l'eau. Complémentaire avec d'autres méthodes déployées depuis la surface, elle permet de collecter des données directes et précises sur des environnements souvent inaccessibles autrement, tout en offrant une perspective unique sur la biodiversité et les habitats subaquatiques. Pratiquée dans un cadre réglementaire strict (encadré 1), l'un des principaux intérêts de la plongée scientifique réside donc dans sa capacité à fournir des observations fines sur des phénomènes qui échappent aux méthodes traditionnelles. Ainsi, les plongeurs peuvent explorer une grande variété d'habitats, cartographier les fonds, instrumenter divers sites et réaliser des prélèvements de différentes natures (eau, sédiment, biocénose), tout en étudiant la faune et la flore aquatiques dans leur milieu naturel avec un minimum de dérangement et sans extraction des organismes de leur milieu de vie. Cet accès direct permet également d'effectuer des inventaires de biodiversité, d'étudier les interactions entre espèces, les comportements ou encore les habitats (i.e. leurs localisations, leurs structures, leurs occupations).

Encadré 1 – La réglementation appliquée à la plongée scientifique.

L'histoire de la plongée scientifique en France n'est pas récente (Jacquet, 2012) et elle est aujourd'hui très réglementée. Elle est en effet régie par plusieurs décrets et articles de loi définissant une grande variété de procédures, de formations ou encore de protocoles de sécurité. Brièvement, pour exercer leur activité en milieu hyperbare (correspondant à une variation de pression d'1 m depuis la surface au niveau des voies aériennes), les plongeurs scientifiques doivent disposer d'un certificat d'aptitude à l'hyperbarie (CAH), dans la mention B.

Différentes classes définissent les profondeurs maximales d'évolution possible à l'air ou avec un mélange suroxygéné (classe 0 : 0-12 m ; classe I : 0-30 m ; classe II : 0-50 m) ou avec un mélange réduisant l'apport en azote, généralement ternaire incluant l'hélium (classe III : 0-100 m).

Un recyclage est obligatoire tous les cinq ans pour ce diplôme délivré par le ministère du travail. Lors d'une mission en plongée, chaque plongeur doit pouvoir justifier d'un ordre de mission (OM) dédié, un certificat médical de plongée professionnelle, et d'une attestation d'aptitude médicale à l'hyperbarie délivrée annuellement par la médecine du travail. Sur chaque « chantier », en plus du matériel commun de sécurité requis et individuel propre à chacun, le chef d'opération hyperbare (COH) doit être en mesure de présenter un manuel de sécurité hyperbare (MSH), une fiche de chantier, une feuille de palanquée, et un plan de prévention.

La plongée est reconnue et soutenue par le département AQUA d'INRAE, l'institut étant comme d'autres (OFB, CNRS, IFREMER, etc) membre du Comité national de la plongée scientifique (CNPS). De nombreuses informations sont disponibles sur le site internet du réseau plongée INRAE (<https://reseau-plongee.hub.inrae.fr/>).

Les plongeurs scientifiques peuvent donc jouer un rôle essentiel dans la collecte de sédiments et d'échantillons biologiques qui ne peuvent pas toujours être obtenus par des méthodes de prélèvements classiques. La plongée permet également de mieux comprendre les impacts humains sur les écosystèmes, comme la pollution ou l'introduction d'espèces invasives. Enfin, un atout original et très important qu'offre « l'outil plongée » est celui de la vulgarisation et de la communication visuelle (images, vidéos) vers le grand public et les gestionnaires. La plongée scientifique en lac est aujourd'hui une pratique bien établie, comme c'est déjà le cas et depuis longtemps pour les milieux marin et océanique. Les scientifiques rattachés au Pôle R&D ECLA (Pôle Recherche et Développement Écosystèmes Lacustres)¹ n'ont pas hésité à s'emparer de cet outil depuis 2019. Dans cet article, nous avons choisi de mettre en avant l'activité en plongée au travers d'exemples relevant de l'instrumentation déployée (pour mesurer, observer, suivre), des prélèvements effectués (pour analyser) et des expérimentations menées (pour tester, comprendre).

Instrumentation

Les plongeurs du pôle déploient régulièrement des capteurs mesurant à haute fréquence divers paramètres environnementaux. Par exemple, dans les lacs et étangs aquitains (projet Vigie-Lacs), la plongée permet le déploiement de sondes de mesures à haute fréquence

Photo ❶ – Entretien d'une sonde à oxygène dans le lac Cazaux-Sanguinet. Photo : © EABX – 2024.



Photo ❷ – Observations et manutention d'un radeau flottant dans le cadre du projet UROS. Photo : © RECOVER – 2025.



de l'oxygène dissous et de la température de l'eau en surface et à proximité du fond (jusqu'à 23 m de profondeur). Le positionnement précis du mouillage des sondes (dispositif constitué d'un corps-mort, d'un bout sur toute la colonne d'eau et d'une bouée de surface) est grandement facilité par la plongée. L'entretien de ces installations se fait également par les plongeurs tout au long de l'année, permettant la récupération des données, l'ajustement des dispositifs aux conditions saisonnières (hauteur d'eau par exemple), ainsi que d'éventuelles réparations en cas de dégradation (photo ❶). Pour des raisons de sécurité liées à la navigation et parfois au matériel (risque de vol) seule la position GPS précise est parfois notée si bien que, dans certaines situations, les plongeurs doivent descendre sur un point identifié depuis la surface et rechercher les instruments de mesure pour récupérer les données ou pour des maintenances régulières².

Une autre catégorie d'instruments couramment déployés par les plongeurs du pôle concerne les systèmes comprenant des caméras visibles, infrarouges ou acoustiques. Dans le Léman, ce type d'enregistreurs automatisés en temps réel et l'obtention d'enregistrements vidéos de haute qualité ont permis de suivre pendant plusieurs semaines un essaim caractéristique de la petite crevette rouge sang *Hemimysis anomala* (espèce exotique) et de documenter un comportement nyctéméral complexe (projet Mysilac). S'abritant de jour dans un récif artificiel (e.g. une buse en béton posée à 4 m de profondeur), l'émergence était systématiquement corrélée au crépuscule, tandis que le retour à la cache au petit matin présentait des tendances temporelles plus complexes. Les événements de retour des animaux étaient systématiquement plus longs que ceux d'émergence, mais les deux étaient significativement influencés par les conditions de luminosité. La fin de l'émergence coïncidait avec la plage de lumière préférentielle connue du mysidé, tandis que le retour commençait plus tôt, avant que les conditions lumineuses ne soient dépassées. Il a été proposé que cette anticipation puisse refléter une variabilité inter-individuelle et/ou des mécanismes de communication collective au sein de l'essaim (Rogissart *et al.*, 2024).

En complément de la mise en place de capteurs mesurant divers paramètres environnementaux (température, oxygène, lumière), des caméras en mode time-lapse (une photo prise toutes les dix minutes) ont également été installées en apnée sur les structures flottantes végétalisées du projet Uros. Ce dernier visait à évaluer l'efficacité de radeaux végétalisés pour soutenir la biodiversité dans des lacs à fort marnage (e.g. le lac-réservoir de Serre-Ponçon). Les caméras ont permis de compléter les suivis déjà réalisés (pêche électrique, nasse et suivi visuel) par des observations photographiques de l'utilisation de ces structures par la faune piscicole et l'évolution des plantes aquatiques ensemencées. Grâce aux prises de vue régulières, il a été possible d'observer et suivre la fréquentation des structures, sans impacter ni modifier le comportement des poissons (Salmon *et al.*, 2025) (photo ❷).

1. <https://poleecla.fr/>

2. Il peut arriver que la plongée soit mobilisée pour la récupération de matériel scientifique perdu, à la suite d'événements climatiques extrêmes, de vandalisme ou une défaillance de matériel ou d'un opérateur.

Un autre exemple d'instruments concerne l'utilisation de chambres de mesure des flux de carbone et d'oxygène déployées dans le cadre du projet C-tropic dans la retenue du barrage hydroélectrique de Petit-Saut en Guyane (photo ③). Ce lac est la plus grande retenue artificielle de France et sa formation résulte de l'immersion de près de 365 km² de forêt tropicale primaire en 1994. Il offre aujourd'hui un paysage lacustre atypique, avec une forêt ennoyée d'arbres morts sur la quasi-totalité de la surface et de nombreuses îles forestières. Le rôle de cette forêt ennoyée dans le fonctionnement écologique de la retenue et dans les émissions importantes de gaz à effet de serre (GES) générées par cet écosystème (Colas *et al.*, 2020) pose de nombreuses questions scientifiques. La densité des troncs et des branchages immergés rend toutefois très délicates les instrumentations en profondeur depuis la surface. Le projet C-Tropic s'est donc appuyé sur la plongée autonome pour descendre le long de troncs d'arbres et installer des chambres de mesure des flux gazeux à l'interface eau/bois à différentes profondeurs (en zones oxiques et anoxiques) et sur le fond du lac à l'interface eau/sédiment. Ces dispositifs ont permis de révéler que les troncs d'arbres émettent peu de GES comparés aux productions issues des sols lacustres, et même qu'ils contribuent à l'oxygénation et à une séquestration importante du carbone émis, grâce aux biofilms photosynthétiques et méthanotrophes qui se développent à leur surface.

Prélèvements

Dans certaines situations, la plongée peut grandement faciliter le prélèvement d'eau, de sédiments ou de divers organismes.

Dans le cadre du projet Uros, des apnéistes ont prélevé à fréquence saisonnière des substrats artificiels amovibles (cages grillagées de 20 x 25 x 0,5 cm³ contenant un substrat) fixés sur le fond des radeaux pour *in fine* évaluer leur colonisation par les macro-invertébrés. Cette manipulation nécessitait un travail subaquatique à environ 1 m de profondeur, consistant dans un premier temps à libérer le substrat de ses fixations puis à le déposer délicatement dans un filet de maille 250 µm avant de l'extraire de l'eau pour le rincer et récupérer les invertébrés aquatiques (Salmon *et al.*, 2022). Un résultat majeur de cette expérience a été que la colonisation par les macroinvertébrés dans les structures flottantes, environnement stable et complexe, a été rapide avec pour caractéristique une abondance et une diversité plus forte que sur les zones littorales naturelles soumises à de fortes variations du niveau d'eau.

L'analyse fine de molécules organiques volatiles possiblement excrétées par les macrophytes a été permise par le prélèvement délicat de ces plantes dans le cadre d'un projet international en cours de valorisation. Slater *et al.* (soumis) ont ainsi révélé que les macrophytes du Léman produisent des quantités substantielles de molécules (isoprène, disulfide, hydrocarbures, monoterpénoïdes, sesquiterpénoïdes, etc.) et que les « volatilomes » varient d'une espèce à l'autre, à savoir les potamots, le myriophylle et le lagarosiphon.

Le carottage de sédiments depuis la surface est souvent une opération délicate que la plongée peut faciliter. Dans le cadre des projets Léon Bloom ou Qualacsed,

des carottes ont été réalisées par les plongeurs scientifiques (photo ④). En vue de collecter de l'eau et des sédiments destinés à des incubations en laboratoire, les carottes doivent nécessairement être réalisées de façon à ne pas mélanger les phases liquides et solides dans l'échantillon. La plongée permet de recueillir soigneusement les deux phases bien dissociées à l'aide d'un carottier manuel. Ceci est beaucoup plus difficile avec un carottier envoyé depuis la surface dans le cas des sédiments organiques très fluides comme c'est le cas dans l'étang de Léon. L'analyse des carottes réalisées pour le

Photo ③ – Prélèvement de biofilm et chambre de mesure des flux de gaz installée à la surface d'un tronc, dans la retenue de Petit-Saut en Guyane, dans le cadre du projet C-tropic.
Photos : © AQUASEARCH – 2024.

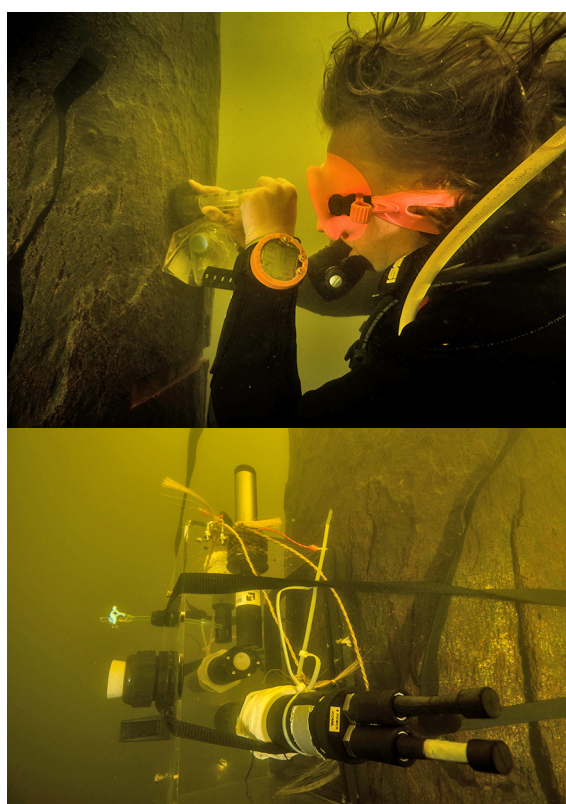
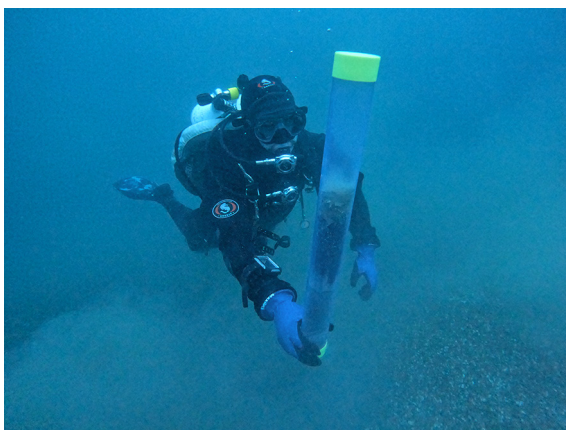


Photo ④ – Carotte de sédiments dans le cadre du projet QUALACSED. Photo : © CARRTEL – 2025.



projet Qualacsed a permis de s'intéresser à l'impact de la moule quagga (*Dreissena rostriformis bugensis*), une espèce exotique fortement envahissante dans le Léman, sur la composition sédimentaire. Fonction (i) de la profondeur, (ii) du taux d'oxygène, (iii) de la source de la matière organique, et (iv) de la granulométrie, il apparaît que le bivalve modifie l'environnement dans lequel il se trouve et change considérablement la composition chimique sédimentaire (Revirand, 2024).

Observations et expérimentations

Une grande diversité d'expérimentations peut être facilitée par le travail en plongée.

Le projet Macoustique a consisté à effectuer un inventaire visuel, la mesure de taille et un comptage de zones riches en macrophytes dans le Léman et dans le lac de Lacanau (photo 5). Les observations et mesures faites en plongée ont été comparées avec d'autres procédés d'observation des plantes depuis la surface (prélèvements au râteau et au grappin depuis la surface, imagerie par hydroacoustique). La plongée a permis un positionnement des points d'étude à grain fin (quadrats de 50 cm) et relever des paramètres sans les détruire (hauteur des plantes, pourcentage de recouvrement). Dans le cas où des prélèvements de plantes étaient nécessaires pour des

mesures ultérieures en laboratoire (biomasses sèches), les plantes ont pu être collectées sur une surface précise contrairement aux engins utilisés classiquement, notamment le râteau ou le grappin. De plus, des informations précieuses pour les observateurs ont été rendues accessibles grâce à la plongée, notamment la visualisation directe de la structure du paysage floristique (assemblage, positionnement, co-occurrence) dans les zones difficiles d'accès depuis la surface.

Lors du projet Uros, un protocole précis d'observation visuelle a été mis en place en apnée pour déterminer les espèces de poissons présentes, les compter et estimer leur taille. La méthode a permis la comparaison de la colonisation des radeaux flottants expérimentés avec les zones littorales voisines (Salmon *et al.*, 2024 ; Salmon *et al.*, 2025). Ces observations *in situ* ont ainsi complété les méthodes de capture traditionnelles telles que les pêches électriques, le piégeage par nasses ainsi que le suivi par piège photo. Il s'agit d'une méthode douce et non invasive d'observation de la faune piscicole qui renseigne également sur le comportement des individus.

Dans le cadre du projet Inva-monitoring, différentes méthodes d'échantillonnage (apnée, plongée, pêche électrique et ADN environnemental) ont été comparées pour détecter une espèce invasive nouvellement arrivée dans le Sud de la France, le gobie à tache noire (*Neogobius melanostomus*). Un suivi de la zone littorale de plusieurs plans d'eau en apnée a été réalisé pour détecter la présence de cette espèce et les habitats qu'elle fréquente. Dans le Léman et le lac du Bourget, la moule quagga évoquée ci-dessus a connu une expansion fulgurante depuis 2015. La plongée a été ou est utilisée pour divers projets (Qualacsed, Quagra, Quaggatract, Qualag) visant à mieux comprendre l'écophysiologie et l'impact de ce bivalve sur le fonctionnement de ces écosystèmes (photo 6). Pour ne citer qu'un exemple, la croissance de l'animal a été déterminée avec précision *in situ* et sans manipulation, dans le Léman, en employant et adaptant la technique de photogrammétrie (Reymondet *et al.*, 2025). Elle a permis de révéler des taux de croissance élevés, variant en moyenne entre moins de 0,001 et 0,29 mm par jour, ces variations étant liées à la classe de taille des individus, à la saison ou encore au type d'environnement (profondeur, substrat).

Dans le cadre du projet C-tropic, les plongées scientifiques ont permis de réaliser des prélèvements et déployer des instruments. Elles ont également révélé un paysage subaquatique insoupçonné, avec, dans les zones anoxiques, une forêt primaire extrêmement bien conservée, presque pétrifiée, parsemée de palmiers dont les feuilles sont toujours en place après trente ans d'immersion. Depuis la surface, aucun scientifique n'avait imaginé un tel paysage encore en place aujourd'hui.

Les limites

Bien que présentant de nombreux avantages, la plongée scientifique en milieu lacustre comporte certaines limites. Les conditions environnementales, comme la météo locale, la faible visibilité, la température de l'eau, ou la profondeur, peuvent rendre certaines observations difficiles voire impossibles. Au-delà de ces contraintes surtout physiques, les plongeurs sont aussi limités par le temps qu'ils peuvent passer sous l'eau (ceci est d'autant

Photo 5 – Mesure de taille de macrophytes dans le cadre du projet MACOUSTIQUE. Photo : © CARRTEL – 2025.



Photo 6 – Prise d'images d'un agrégat de moules dans le cadre du projet QUAGRA. Photo : © SUBBEAR – 2025.



plus vrai pour l'apnée), la fréquence des plongées et par les technologies (circuit ouvert) dont ils disposent pour explorer les fonds lacustres. Les coûts associés à la plongée scientifique (pour obtenir et recycler son habilitation, faire des formations spécialisées, financer les besoins associés, l'équipement et les missions pour réaliser des explorations en toute sécurité), peuvent aussi constituer des obstacles. En outre, l'accès à certaines zones protégées ou éloignées est parfois restreint. Enfin, n'oublions pas qu'il est nécessaire d'être deux à trois plongeurs certifiés au minimum pour chaque mission et cela sous-entend de la disponibilité. Retenons toutefois, comme point positif, que les équipements de plongée ne sont pas très périssables et que ce type d'investissement dure assez longtemps.

Des perspectives

Les perspectives de développement de la plongée scientifique en lac sont nombreuses. La visibilité croissante de l'outil conjuguée à la structuration et à la réactivité du réseau plongée INRAE (encadré 1) donnent des nouvelles idées aux chercheurs pour certains de leurs projets. Dans l'avenir, il apparaît évident que le recours aux plongeurs amateurs pour initier des approches de sciences participatives se développera et permettra de démultiplier les observations en les étendant géographiquement, dans différents contextes, sur différentes populations, etc. Par exemple, un projet visant à évaluer l'attractivité de différents types de sons pour le silure glane (*Silurus glanis*) devrait faire appel aux plongeurs de loisirs sur différents sites pour déployer un protocole standard d'émission sonore subaquatique et de collecte d'informations sur la réaction comportementale du silure.

Sur le plan technologique, développer des partenariats entre les secteurs public et privé pour concevoir des systèmes aussi performants que ceux utilisés en milieu terrestre est en réflexion car il y a de la demande potentielle. Citons, par exemple, la volonté de développer des systèmes d'intelligence artificielle pour automatiser les reconnaissances d'espèces et le comptage des individus sous l'eau. Ce type d'approche, associé à l'utilisation par les plongeurs de recycleurs³ pour observer, sans faire de bruit et plus longtemps, le comportement des animaux, en particulier les poissons, constituera sans nul doute un énorme pas en avant dans les années à venir. ■

3. Dispositifs qui recyclent l'air expiré par le plongeur qui peut donc le réutiliser après que ce dernier ait été filtré et réenrichi en oxygène.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Hervé ROGISSART, Victor FROSSARD, Jérôme LE COZ et Mario LEPAGE pour leur relecture critique du manuscrit.

RÉFÉRENCES

- Colas, F., Chanudet, V., Daufresne, M., Buchet, L., Vigouroux, R., Bonnet, A., Jacob, F. & Baudoin, J. M. (2020). Spatial and temporal variability of diffusive CO₂ and CH₄ fluxes from the Amazonian reservoir Petit-Saut (French Guiana) reveals the importance of allochthonous inputs for long-term C emissions. *Global Biogeochemical Cycles*, 34(12), e2020GB006602. <https://doi.org/10.1029/2020GB006602>
- Jacquet, S. (2012). Ils plongent pour la science : une petite Histoire de la plongée scientifique en France. *Subaqua*, 244, 74-77. <https://hal.inrae.fr/hal-02641791v1>
- Revirand, L. (2024). Impacts de la moule quagga à l'interface eau-sédiments du Léman [Mémoire de maîtrise, université Clermont-Auvergne].
- Reymondet, E., Beisel, J. N., Grimond, J. & Jacquet, S. (2025). Photogrammetric assessment of quagga mussel growth shows no winter cessation in Lake Geneva. *Scientific Reports*, 15(1), 8309. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93064-8>
- Rogissart, H., Frossard, V., Guillard, J., Rautureau, C. & Jacquet, S. (2024). Tracking the real-time behavior of *Hemimysis anomala*'s winter swarms using acoustic camera. *Journal of Great Lake Research*, 50(1), 102250. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2023.102250>
- Salmon, Q., Colas, F., Westrelin, S., Dublon J. & Baudoin, J. M. (2022). Floating Littoral Zone (FLOLIZ): A solution to sustain macroinvertebrate communities in regulated lakes? *Ecological Engineering*, 176, 106509. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106509>
- Salmon, Q., Westrelin, S., Dublon, J., Abadie, E. & Baudoin, J. M. (2024). Artificial floating littoral zones: a promising nursery to support Pike (*Esox lucius*) in reservoirs. *International Journal of Limnology*, 60, 22. <https://doi.org/10.1051/limn/2024022>
- Salmon, Q., Westrelin, S., Dublon, J., Fonbonne, S. & Baudoin, J. M. (2025). An evaluation of artificial floating littoral zones to support fish communities in reservoirs. *Knowledge and Managing of Aquatic Ecosystems*, 426, 3. <https://doi.org/10.1051/kmae/2024025>
- Slater, E. S., Steinke, M., Hughes, R., Rinnan, R., Chiapusio, G., Riemann, L., Jacquet, S., Tran Khac, V. & Laurion, I. (2025). Volatiles from submerged macrophytes in a large meso-oligotrophic lake. Article soumis pour publication.